

Der Auflauf unregelmäßiger Wellen im Übergangsbereich zwischen Branden und Schwingen

Torsten Heyer, Reinhard Pohl

Der bisher noch wenig untersuchte Wellenauflauf im Übergangsbereich zwischen Brandung und Reflexion wurde experimentell untersucht. Darauf aufbauend wird ein geschlossener Berechnungsansatz für die Auflaufhöhe unregelmäßiger Wellen vorgeschlagen, der für brechende und nichtbrechende Wellen anwendbar ist.

1. Einführung

Beim Auflauf windzeugter Wellen ergeben sich in Abhängigkeit von den Wellenparametern und von den spezifischen Eigenschaften der Bauwerksböschung (z. B. Neigungswinkel, Rauheit) Auflaufhöhen, deren Einschätzung eine wesentliche Komponente in den Bemessungskonzepten von Wasserbauwerken, speziell der erforderlichen Freibordhöhe, darstellen. Während der Auflauf entweder für brandende oder für schwingende Wellen analytisch in guter Näherung innerhalb bestimmter Gültigkeitsgrenzen bestimmt werden kann, existieren für den Übergangsbereich bisher kaum praktikable Formeln, obwohl dieser Bereich der steilen Dammböschungen sowohl bei sehr alten Talsperrendämmen (z. B. Revierwasserlaufanstalt Freiberg/Sa. 15. – 17. Jh.) als auch bei neuen Absperrbauwerken (zunehmend Böschungen bis 1:1,3) von Bedeutung ist.

Auf Grund der unterschiedlichen Energieumwandlungsvorgänge beim Auftreffen der Wellen auf das Bauwerk werden Auflaufereignisse durch brechende (brandende) und durch nichtbrechende (schwingende) Wellen unterschieden. Als Abgrenzungskriterium dient der Brandungsparameter ξ (surf similarity parameter; breaker parameter), der als Verhältnis von Wellensteilheit und Böschungseigung definiert ist.

$$\text{Brandungsparameter: } \xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L}} \\ \text{oder } \xi' = \frac{\sin \alpha}{\sqrt{H/L}}$$

Bild 2 zeigt die von verschiedenen Autoren empfohlenen Grenzwerte, die einer Einschätzung der zu erwartenden Auflaufursache und somit der Auswahl eines adäquaten Berechnungsansatzes dienen sollen.

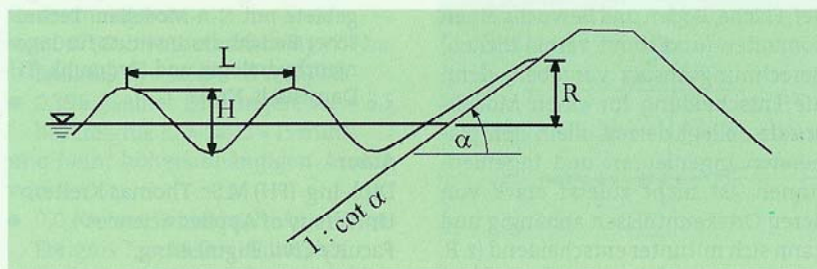


Bild 1: Definition der Kenngrößen zum Wellenauflauf

Die größtenteils empirisch bzw. halbempirisch gefundenen Gleichungen zur Ermittlung der Auflaufhöhen sind nur in bestimmten Grenzen gültig. Bei üblichen Wellensteilheiten liefern die Gleichungen für den schwingenden und brandenden Bereich für Böschungseigungen von 1:2 bis ca. 1:0,5 oft zu hohe Aufläufe.

Mit dem Bestreben zur Verminderung der Baukosten von Wasserbauwerken durch Reduzierung der Dammvolumina (Kubatur) wird besonders die Bestimmung des notwendigen Freibordes und somit der Auflaufhöhe gerade für Böschungen, die sich im Übergangsbereich befinden, zunehmend aktuell.

1.1. Ansatz für eine geschlossene Lösung

Bei einem früheren Ansatz mit einer geschlossenen Lösung für die Berechnung der Auflaufhöhen auf glatten und fast glatten Böschungen [1] wird davon ausgegangen, dass auf Böschungen im Übergangsbereich sowohl brandende als auch brechende Wellen auftreten und man somit beiden Arten eine Eintrittswahrscheinlichkeit zuordnen kann. Definiert man die Eintrittswahrscheinlichkeit schwingender Wellen mit P , so beträgt die Eintrittswahrscheinlichkeit brechender Wellen $(1-P)$.

Folglich kann eine einheitliche Gleichung zur Bestimmung des Wellenauflaufes für den schwingenden, brandenden und den Übergangsbereich ausgedrückt werden durch:

$$R = R_{nb} \cdot P + R_b \cdot (1-P) \cdot k_r \quad (1)$$

R_{nb} bzw. R_b sind die Auflaufhöhen nicht brechender (schwingender) bzw. brechender (brandender) Wellen, die sich mit den Formeln für den jeweili-

gen Bereich ergeben würden. Rauheitsbeiwerte k_r sind im Abschnitt 2.3 angegeben.

Die enthaltene Wahrscheinlichkeitsfunktion P (auch interpretierbar als Wichtungsfunktion) wurde gewählt zu:

$$P = 1 - e^{-\left(\frac{\xi}{a}\right)^c} \quad (2)$$

Die bisherigen Untersuchungen mit regelmäßigen Wellen unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse anderer Autoren ergaben die Parameter in Gl. (2) bei Verwendung des modifizierten Brandungsparameters $\xi' = \sin \alpha / \sqrt{H/L}$ zu $a = 2,2$ und $c = 3$. Eine weitere Anpassung und Verifizierung dieser Parameter war die Motivation für Modellversuche mit unregelmäßigen Wellen.

2. Modellversuch zum Wellenauflauf auf glatten Böschungen

2.1. Aufbau und Versuchsdurchführung

In einer ersten Versuchsreihe wurden im Wellenkanal des Hubert-Engels-Labors des Institutes für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden (30 m lang, 80 cm breit, 80 cm tief) folgende Böschungsneigungen untersucht:

Versuch-Nr.	Neigung (1:m)	Winkel α
1	1:2	26,6°
2	1:1,3	37,6°
3	1:1	45,0°
4	1:0,5	63,4°

Das durch die Wellenmaschine erzeugte Wellenspektrum entsprach einem JONSWAP-Spektrum (JOint North Sea Wave Project, 1972) für Tiefwasserhältnisse mit folgenden Eingangskennwerten im Modellversuch ($M 1:14$; $H_{m0,Natur} \approx 1\text{m}$):

Anzahl der Elementarwellen: 8193
 Peakfrequenz: $f_p = 1,14\text{ Hz}$
 signifikante Wellenhöhe: $H_{m0} = 7,7\text{ cm}$
 Dauer der auswertbaren Zeitreihe: 256 Sekunden

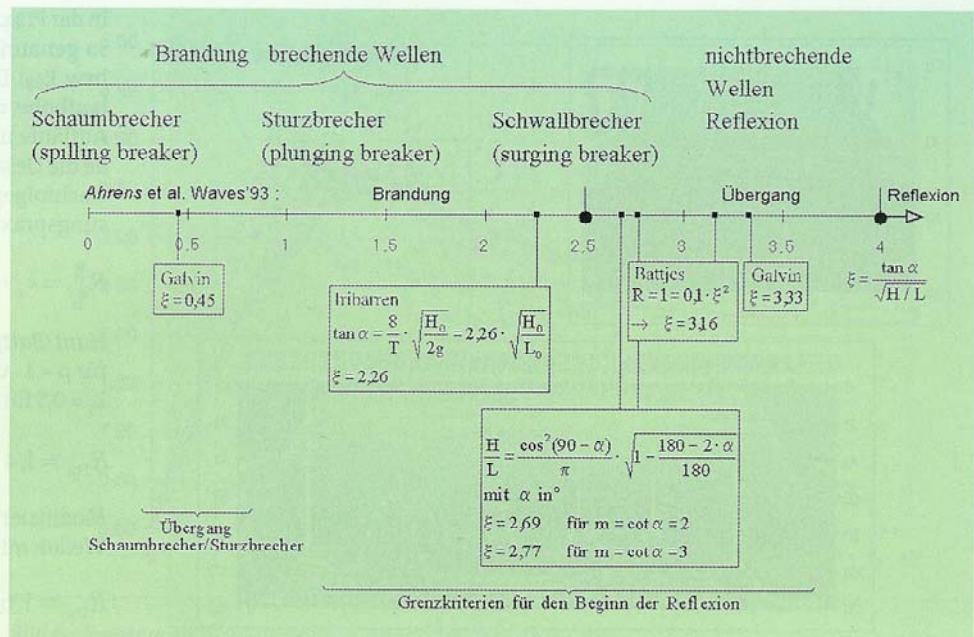


Bild 2: Einteilung der Wellenaufbauursache in Abhängigkeit vom Brandungsparameter $\xi_0 = \xi$

Die Messung der Wasserspiegelauslenkung erfolgte vor dem Fußpunkt der Böschung unter Verwendung von drei in Wellenanlaufrichtung angeordneten kapazitiven Messpegeln (Bild 3). Die Messwerte dieses Mehrpegelsystems bildeten die Grundlage für die Reflexionsanalyse (Verfahren nach Mansard, Funke) [2], wodurch das anlaufende und das reflektierte Wellenspektrum separiert werden konnten.

Die Auslenkungen der Wasserspiegellinie auf der glatten Böschung wurden in den Versuchsreihen durch eine synchron gesteuerte Digitalkamera erfasst. Mit

Hilfe der Bildverarbeitung konnten die Aufbaufereignisse erkannt und ausgewertet werden. Bild 4 zeigt beispielhaft Auswertungsgrafiken dieses im Institut entwickelten berührungslosen Verfahrens.

Die ermittelten Werte der anlaufenden Wellen und der Aufbaufhöhen bildeten die Datengrundlage für die statistische Auswertung und eine anschließenden Gegenüberstellung charakteristischer Größen der Wellenkennwerte und Aufbaufhöhen.

2.2. Versuchsergebnisse

Nach Durchführung der Reflexionsanalyse mit dem Mehrpegelsystem konnte eine gute Übereinstimmung des angesteuerten Wellenspektrums und des

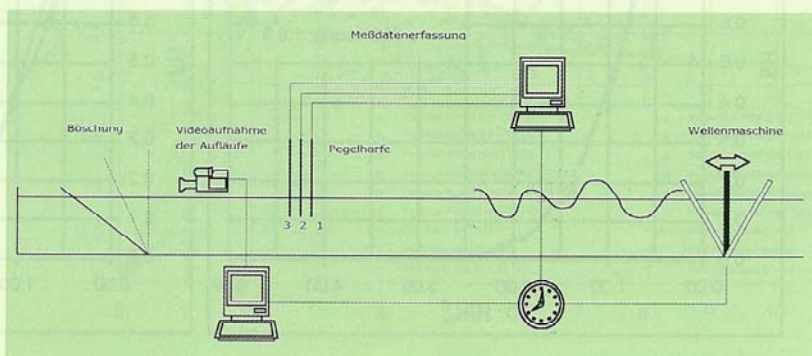


Bild 3: Versuchsaufbau

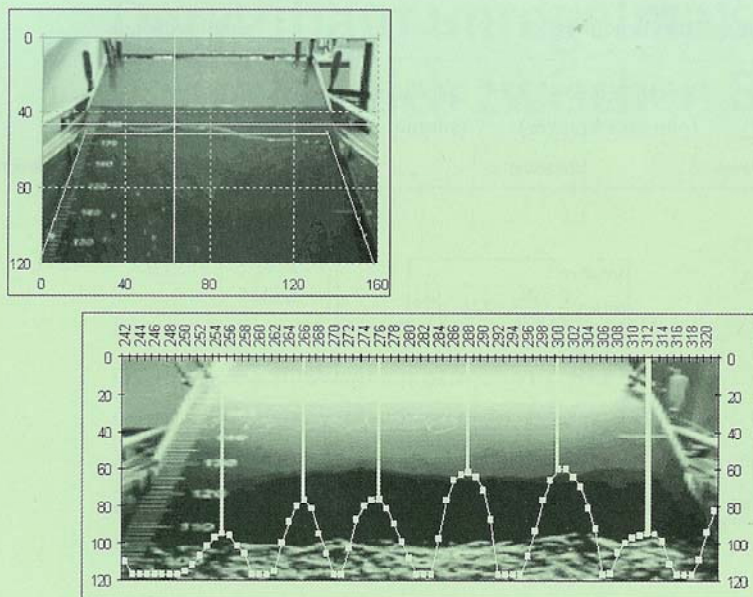


Bild 4: Auswertungsgrafik Wellenaufwurf als Ergebnis der computergestützten Bildverarbeitung

gemessenen Spektrums am Böschungsfuß festgestellt werden. Die Verteilungsfunktionen für die Wellenhöhen H und die Auflauhöhen R entsprechen in allen Versuchsreihen näherungsweise einer *Rayleigh*-Verteilung. Im Bereich größerer Absolutwerte der Auflauhöhen ($R > R_m$) wurden die theoretischen Werte der *Rayleigh*-Verteilung teilweise geringfügig überschritten. Die Gegenüberstellung der Wellenanzahl mit der Anzahl der Wellenauf-

läufe ergab, dass 80 – 90 % der Wellen einen Aufwurf verursachten. Ein direkter Zusammenhang zwischen größerer Aufwurfdauer bei flacheren Böschungseigungen und der zu vermutenden geringeren Anzahl an Wellenaufwürfen konnte durch die Versuche nicht bestätigt werden.

In der Praxis der Freibordbemessung wird häufig der so genannte 2%-Wellenaufwurf verwendet (als $R_{2\%}$ bzw. R_{98}). Dieser Parameter definiert eine Wellenaufwurfhöhe, die von 2 % (aus N Werten) der ermittelten Aufwürfe überschritten wird. Als Bezugswert N wurde die Gesamtanzahl der Wellen verwendet.

Nachfolgend sind einige in der derzeitigen Bemessungspraxis angewendete Formeln aufgeführt:

$$R_{2\%} = k_r \cdot C \cdot \sqrt{H_m \cdot L_m} \cdot \tan(\alpha) \quad (3)$$

Hunt/Battjes [3] für brandende Wellen mit $C = 2,23$ für $\rho = 1$ und $C = 1,78$ für $\rho = 0$; $k_r = 1$ für glatte und $k_r = 0,5$ für sehr raue bzw. durchlässige Böschungen)

$$R_{2\%} = 1,4 \cdot K \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot \alpha}} \cdot H_s \quad (4)$$

Modifizierte Formel von *Pocklington* (schwingende Wellen mit $K = 1,35$)

$$R_{2\%} = 1,6 \cdot \gamma_h \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_0 \cdot H_s \quad (5)$$

van der Meer (für brandende Wellen) mit: γ_β ; γ_h ; γ_f ; (Reduktionsfaktoren für schräg anlaufende Wellen, Flachwasser am Böschungsfuß und Böschungsrauheit)

$$R_{2\%} = \frac{0,5 \cdot H_{2\%} \cdot (k_{ref} + 1) \cdot (\sqrt{2} \cdot \cos \alpha + 1)}{\frac{1}{\cos B} - 2 \cdot \pi \cdot \delta \cdot (\sqrt{2} \cdot \cos \alpha + \tan B) \cot \alpha}$$

mit $B = \sqrt{2} \cdot \cos \alpha$ und k_{ref} = Reflexionskoeffizient

(6) *Wagner* (für schwingende Wellen)

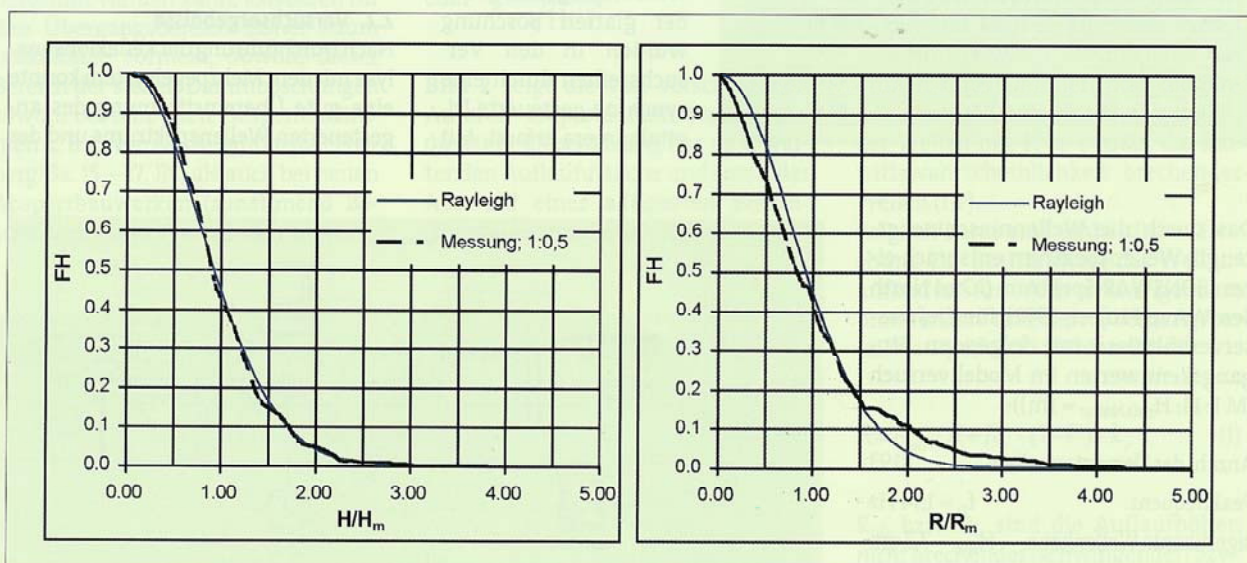


Bild 5: Überschreitungswahrscheinlichkeiten H und R (Versuch: Böschung 1:0,5)

$$R = R_{nb} \cdot \left(\frac{\xi_0 - 2,5}{1,5} \right) + R_b \cdot \left(\frac{4 - \xi_0}{1,5} \right) \quad (6)$$

Man erhält mit dieser Gleichung ebenfalls ein Maximum des Auflaufes im in Frage kommenden Bereich. Für den Auflauf brechender Wellen wird die empirische Gleichung (7) angegeben. Die kompliziertere Gleichung (8) für den Auflauf schwingender Wellen bedarf verschiedener Zusatzannahmen und entspricht deshalb nicht ganz dem selbst gestellten Ziel der Autoren (AHRENS U. A.) nach Entwicklung einer einfachen Gleichung. Durch die Werte $\xi_0 = 2,5$ und $\xi_0 = 4$ werden drei Bereiche gebildet, in denen jeweils eine andere Rechenvorschrift gilt. Das Hauptproblem besteht darin, dass die sich an die Messwerte gut anpassenden Kurven nur für die Grenze zwischen Tief- und Flachwasserbedingungen von $d_s/L_p \approx 0,5$ (in Bild 6 $d_s/L_p \approx 0,43$) ergeben. Für große Wassertiefen werden lokale Minima im Bereich $\xi_0 = 5 \dots 7$ berechnet, die nicht ohne weiteres erklärbar sind und noch einer weiteren Überprüfung bedürfen.

$$\frac{R_2}{H_s} = \frac{2,26 \cdot \xi_0}{1 + 0,324 \cdot \xi_0} \quad (7)$$

$$\frac{R_2}{H_{m0}} = (1,61 \pm 0,24) \cdot \exp(2,48 \cdot X_p + 0,446 \cdot \{\cos \alpha\}^{3,5} + 0,194 \cdot \Pi) \quad (8)$$

mit $X_p = \frac{d \cdot \cot \alpha}{L_{Tp}} - \left(\frac{d \cdot \cot \alpha}{L_{Tp}} \right)^2$ und $\Pi = \frac{(H_{m0} / L_{Tp})}{[\tanh(2 \cdot \pi \cdot d / L_{Tp})]^3}$

HUGHES [7] bezieht sich auf die Daten von Ahrens [8] und approximiert zunächst die Funktion $R_{2\%}/H_s = f(\xi_0)$ durch jeweils eine Gerade für den schwingenden und den brandenden Bereich:

$$\frac{R_2}{H_s} = 1,6 \cdot \xi_0 \quad \text{für } \xi_0 < 2,5 \quad \frac{R_2}{H_s} = 4,5 - 0,2 \cdot \xi_0 \quad \text{für } \xi_0 > 2,5 \quad (9)$$

Darüber hinaus gibt es empirische Gleichungen auf der Grundlage der Impulserhaltung zwischen der anlaufenden Welle und dem Auflaufkeil in der Form

$$\frac{R_2}{d} = f \left(\frac{M_F}{\rho \cdot g \cdot d} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

an, wobei der Klammerausdruck den speziell definierten dimensionslosen Wellenimpulsflussparameter darstellt. Auch hier wird eine bereichsweise Unterscheidung erforderlich. Die Darstellung der Auflaufhöhe als R_2/d dürfte für den Flachwasserbereich an der Küste praktikabel sein.

3. Schlussfolgerung, Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde mit Hilfe von Modellversuchen die Wellenaufbauhöhe auf glatten Böschungen im Übergangsbereich zwischen Branden und Schwingen bestimmt, wodurch zutreffendere Bemessungen als nach den in den Regelwerken enthaltenen Ansätzen möglich sind. Für die Berechnung der relativen Auflaufhöhe wird Gleichung (1) unter Einbeziehung der Gln. (2), (3) und (4) empfohlen. Die Ergebnisse fügen sich gut in die Ansätze anderer Autoren ein. Weiter verbesserte Aussagen über die Lage des zu vermutenden Maximums der relativen Auflaufhöhe und den

Literatur

- [1] POHL, R.: Wellenaufbau im Übergangsbereich zwischen Brandung und Reflexion.- In: Hansa, Hamburg 134(1997)10, S. 62-64
- [2] MANSARD; E.P.D.; FUNKE, E.R.: The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. - In: Proceedings of the 17th Coastal Engineering Conference; American Society of Civil Engineers, Vol. 1, pp. 154-172, 1980
- [3] Battjes, J.A.: Run-up distributions of waves breaking on slopes.- In: Proc. ASCE, Journ. of waterways, harbor and coastal eng. div.- 97(1971)WW1, S. 91-114
- [4] Van der Meer, J.W.; STAM C.-J. M.: Wave run-up on smooth and rock slopes of coastal structures.- In: Proc. ASCE, Journ. of waterways, port, coastal and ocean eng. - 118(1992) WW5, pp 534 - 550
- [5] VAN DER MEER, J. W.; JANSSEN, J. P.: Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments; Delft Hydraulics, Publication 485; August (1994)
- [6] AHRENS, J. P., SEELIG, W. N., WARD, D. L., ALLSOP, W.: Wave Runup on and Wave Reflection from Coastal Structures.- In: Proc. 2nd Ocean Wave Measurement and Analysis Conf., New Orleans 1993, pp. 489 - 502
- [7] HUGHES, S. A.: Estimating Irregular Wave Runup on smooth, impermeable Slopes.- U.S. Army Corps of Engineers ERDC/CHL CHETN-III-68, Sept. 2003
- [8] AHRENS, J. P.: Irregular Wave Runup on Smooth Slopes.- Coastal Engineering Technical Aid No. 81 - 17, Dec., U.S. Army Corps of Engineers, CERC, Ft. Belvoir, Va. 22060, 1981
- [9] WAGNER, H.: Seebau und Küstenschutz.1 - VEB Verlag Technik, Berlin 1974

Autoren

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhard Pohl
Dipl.-Ing. Torsten Heyer
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
TU Dresden
George-Bähr-Str. 1
01069 Dresden
E-Mail:
reinhard.pohl@mailbox.tu-dresden.de

Verlauf der Kurve sollten durch ergänzende Modellversuche ermöglicht werden. Empfohlen wird eine fein abgestufte Untersuchung der Böschungsneigungen von 1:1,8 bis ca. 1:1.

Dank

Die Autoren danken dem Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie für die Unterstützung der Arbeiten.